آخر تحديث: November 1, 2026

عن هذه الدورة

يتضمن هذا المقرر المجاني 10 وحدات و6 مختبرات. هذه الأعداد الحقيقية وليست منهجًا أطول جرى اختصاره.

التحقق هو رقم أو نتيجة برمجية في صفحة مقرر يعيد سكربت حسابها قبل النشر. يجب أن يطابق الرقم المعروض الرقم المعاد حسابه.

هذا مخطط دورة مجانية للتعلّم الذاتي كتبته Saving Planets. وهو ليس مقررًا جامعيًا، ولا يمنح ساعات معتمدة، ولا تشارك فيه أي مؤسسة تعليمية.

يتبع نطاقه مقررًا فصليًا في الميكانيكا المدارية للسنة الثالثة. وهو مبني على موضوعات وعمق MIT 16.346 Astrodynamics والأجزاء المدارية من MIT 16.07 Dynamics (مجانًا على MIT OpenCourseWare)، وعلى مقررات مثل Purdue AAE 340 وGeorgia Tech AE 3330، مع استخدام Basics of Space Flight المجاني من NASA وOpenStax University Physics، ونربط بهما حيث يفيدان. لا يتبنى أيٌّ من هؤلاء المؤلفين أو المؤسسات أو الوكالات هذه الصفحة.

ما نضيفه: كل وحدة مرتبطة بعمل حقيقي بمصدر عام موثق (Landsat، وأقمار الطقس GOES، واختبار الدفاع الكوكبي DART لدى NASA، وقواعد الحطام المداري)، وكل رقم في الصفحة يُعاد حسابه بنص برمجي للتحقق قبل نشره، ولكل مختبر محاكاة مجانية أو جدول بيانات.

تابعها بالترتيب. في كل وحدة أهداف وأفكار أساسية ومعادلات وأمثلة خطوة بخطوة وتمارين بإجابات كاملة وأخطاء شائعة وبطاقات تعليمية واختبار قصير. يُحفظ تقدّمك في هذا المتصفح فقط.

كيف تساعد هذه الدورة في إنقاذ الكوكب

المدارات هي وسيلتنا لمراقبة كوكبنا: فأقمار رصد الأرض في المدارات المنخفضة ترسم خرائط الغابات والمحاصيل والمياه، وأقمار الطقس الثابتة بالنسبة إلى الأرض تراقب العواصف على مدار الساعة. واختيار تلك المدارات ميكانيكا مدارية خالصة.

والمدارات أيضًا مورد مشترك ومحدود. فالحطام المتروك في الفضاء يهدد الأقمار التي نعتمد عليها، لذا بات التصميم المسؤول للبعثات يتضمن خطة لمغادرة المدار. تنتهي كل وحدة بقسم قصير موثق المصادر. والقيم التي ليست من مصدر موسومة بأنها قيم نموذجية أو مرجعية.

للمعلمين

يمكنك تدريس هذا المقرر، أو أن يتابعه الطالب وحده. إنه مجاني. Saving Planets لا تمنح درجة ولا ساعات معتمدة.

- هذه الصفحة هي المقرر كاملًا: 10 وحدات و6 مختبرات (AERO 340).
- خطّط لخمسة عشر أسبوعًا، نحو 6 إلى 9 ساعات في الأسبوع، بما في ذلك أسابيع المختبر.

- اتبع جدول الخمسة عشر أسبوعًا. اقرأ الوحدة، حلّ التمارين على الورق، ثم افتح الإجابة. في أسبوع المختبر، نفّذ المختبر أو نسخته المنزلية.
- التحقق هو رقم أو نتيجة برمجية في الصفحة يعيد سكربت حسابها قبل النشر. يجب أن يطابق الرقم الظاهر الرقم المعاد حسابه.
- استخدم طباعة هذه الصفحة، أو نزّل دليل الدراسة PDF. ورقة القوانين قرب النهاية.
- اسأل: كيف تساعد هذه الوحدة الناس والكوكب؟ في كل وحدة مربع أخضر فيه حقيقة مع مصدرها.
- انسخ نموذج دليل المعلم واكتب اسم صفك والوقت المتاح والأسئلة التي ستطرحها. افتح نموذج دليل المعلم

قبل أن تبدأ

المتطلبات السابقة

- الديناميكا: قوانين نيوتن والزخم الزاوي والطاقة.
- التفاضل والتكامل III والمعادلات التفاضلية: المتجهات والتدرجات والمعادلات التفاضلية العادية.
- الجبر الخطي: المتجهات والدورانات وأطر الإحداثيات.
- الفيزياء I: الجاذبية الكونية.

كيف تذاكر

- ابدأ كل مسألة برسم تخطيطي للمدار: الجسم المركزي والحضيض والأوج وموقع المركبة.
- اكتب معادلة vis-viva أولًا؛ فهي تجيب عن معظم أسئلة السرعة.
- أبقِ الوحدات بالمتر والثانية، وμ بوحدة m^3/s^2؛ وحوّل إلى km في النهاية فقط.
- ارسم كل مناورة مثلثَ سرعات قبل حساب Δv.
- تحقق من الحالات الحدية: المدار الدائري له $e = 0$؛ والإفلات طاقته الكلية صفر.
- حل كل تمرين على الورق قبل فتح الإجابة، وأعد الاختبارات القصيرة بعد بضعة أيام.

ماذا تحتاج

- حاسوب أو جهاز لوحي لمحاكاة PhET المجانية Gravity and Orbits وKepler’s Laws وMy Solar System.
- NASA’s Eyes on the Solar System في متصفح الويب.
- برنامج جداول بيانات لمختبرات الانتقال ومعادلة الصاروخ والمسار الأرضي.
- آلة حاسبة بدوال مثلثية.

جدول مقترح من 15 أسبوعًا

نحو 6 إلى 9 ساعات أسبوعيًا: قراءة وتمارين، وفي أسابيع المختبر، المختبر.

الأسبوع	الوحدة	الموضوعات	القراءة
1	الجاذبية ومسألة الجسمين والمدارات الدائرية	الجاذبية، مسألة الجسمين، المدارات الدائرية؛ المختبر A	OpenStax UP1 13.4–13.5
2	القطوع المخروطية والطاقة والعناصر المدارية	الطاقة، الزخم الزاوي، القطوع المخروطية	MIT 16.346

الأسبوع	الوحدة	الموضوعات	القراءة
3	القطوع المخروطية والطاقة والعناصر المدارية	vis-viva والعناصر المدارية؛ المختبر B	NASA Basics of Space Flight
4	معادلة كبلر وزمن الطيران	معادلة كبلر وزمن الطيران	MIT 16.346
5	الانتقالات المدارية: هوهمان وما بعده	المناورات الدفعية وانتقالات هوهمان	MIT 16.346
6	الانتقالات المدارية: هوهمان وما بعده	ثنائي القطع الناقص، الطور، الخروج من المدار؛ المختبر C	MIT 16.346
7	تغيير المستوى والمناورات المركبة	تغيير المستوى والاحتراقات المركبة؛ تدريب منتصف الفصل	MIT 16.346
8	الصواريخ وميزانيات Δv والمراحل	معادلة الصاروخ، المراحل، ميزانيات Δv؛ المختبر D	OpenStax UP1 9.7
9	الاضطرابات: انتفاخ الأرض والسحب والمدارات المتزامنة مع الشمس	J_2 وتراجع العقد	MIT 16.346
10	الاضطرابات: انتفاخ الأرض والسحب والمدارات المتزامنة مع الشمس	المدارات المتزامنة مع الشمس والسحب؛ المختبر E	NASA Landsat 9
11	المسارات الأرضية والتغطية والكوكبات	المسارات الأرضية، التغطية، الكوكبات؛ المختبر F	NASA Eyes
12	الانتقالات بين الكواكب والقطوع المخروطية الموصولة	الانتقالات حول الشمس والقطوع المخروطية الموصولة	NASA Basics of Space Flight
13	الانتقالات بين الكواكب والقطوع المخروطية الموصولة	نوافذ الإطلاق ومساعدات الجاذبية	NASA Basics of Space Flight
14	استدامة الفضاء: الحطام والتخلص والدفاع الكوكبي	الحطام والتخلص وتجنب التصادم	NASA ODPO; FCC
15	استدامة الفضاء: الحطام والتخلص والدفاع الكوكبي	الدفاع الكوكبي؛ تدريب الامتحان النهائي	NASA DART

تقدّمك

ضع علامة على الوحدات والمختبرات عند إنهائها، وخض الاختبارات. يُحفظ التقدم ونتائج الاختبارات في هذا المتصفح فقط، ولا تُرسل إلينا أبدًا.

الوحدات

الجاذبية ومسألة الجسمين والمدارات الدائرية

قانون نيوتن للجاذبية، ومعامل الجاذبية μ، ومعادلة حركة الجسمين، وسرعة المدار الدائري ودوره، وسرعة الإفلات، وقوانين كبلر الثلاثة، والمدارات المنخفضة والمتوسطة والثابتة بالنسبة إلى الأرض.

أهداف التعلّم

في نهاية هذه الوحدة ستستطيع أن:

- كتابة معادلة حركة الجسمين.
- حساب سرعة المدار الدائري ودوره.
- حساب سرعة الإفلات.
- إيجاد نصف قطر المدار الثابت بالنسبة للأرض.

المفاهيم الأساسية

- تعطي جاذبية نيوتن معادلة الجسمين r̈ = −μr/r³، حيث μ = GM. وللأرض μ = 3.986 × 10¹⁴ m³/s².
- للمدار الدائري سرعة v = √(μ/r) ودور T = 2π√(r³/μ): فالمدارات الأعلى أبطأ وتستغرق وقتًا أطول.
- سرعة الإفلات تساوي √2 ضعف السرعة الدائرية عند نصف القطر نفسه: v_esc = √(2μ/r).
- قوانين كبلر: المدارات قطوع ناقصة يقع الجسم المركزي في إحدى بؤرتيها؛ ونصف القطر يمسح مساحات متساوية في أزمنة متساوية؛ وT^2 يتناسب مع a^3.
- المدار الثابت بالنسبة إلى الأرض دوره يوم نجمي واحد (86164.1 s) ويقع فوق خط الاستواء، فيبقى القمر الصناعي فوق النقطة نفسها.

المعادلات الأساسية

$$\ddot{\mathbf{r}} = -\frac{\mu}{r^3}\mathbf{r}$$

r=-(μ)/(r^3) r

معادلة الجسمين

$$v_c = \sqrt{\frac{\mu}{r}}$$

v_c=(μ)/(r)

السرعة الدائرية

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{a^3}{\mu}}$$

T=2π(a^3)/(μ)

الدورة

$$v_{esc} = \sqrt{\frac{2\mu}{r}}$$

v_esc=(2μ)/(r)

سرعة الإفلات

أمثلة محلولة خطوة بخطوة

مثال 1.1 أوجد سرعة ودور مدار دائري على ارتفاع 400 km.

1. r = 6378 + 400 = 6778 km.
2. v = √(3.986 × 10¹⁴/6.778 × 10⁶).
3. T = 2π√(r³/μ).

الإجابة: v = 7.67 km/s؛ T = 92.6 min.

مثال 1.2 أوجد سرعة الإفلات من ذلك الارتفاع.

1. v_esc = √2 × 7.669.

الإجابة: v_esc = 10.85 km/s.

مثال 1.3 أوجد نصف القطر والارتفاع للمدار الثابت بالنسبة إلى الأرض.

1. r = (μT²/(4π²))^(1/3) مع T = 86164.1 s.
2. الارتفاع = 42164 − 6378.

الإجابة: r = 42164 km؛ الارتفاع 35786 km (22236 ميلًا)؛ v = 3.07 km/s.

تمارين

حلّ كلًّا منها على الورق أولًا، ثم تحقق.

1. أوجد دور مدار دائري على ارتفاع 705 km.

   98.9 min.

2. أوجد السرعة هناك.

   7.50 km/s.

3. كم مدارًا في اليوم يساوي ذلك؟

1440/98.87 = 14.56.

4. حوّل 7.67 km/s إلى mph.

17154 mph.

مفاهيم خاطئة شائعة

خرافة: المدارات الأعلى أسرع.
في الحقيقة: إنها أبطأ.

خرافة: يطفو رواد الفضاء لأنه لا توجد جاذبية.
في الحقيقة: إنهم في سقوط حر حول الأرض.

خرافة: يمكن أن يكون المدار الثابت فوق أي مدينة.
في الحقيقة: يجب أن يكون فوق خط الاستواء.

بطاقات تعليمية

μ

$GM = 3.986 \times 10^{14}\ m^3/s^2$.

السرعة الدائرية

$\sqrt{(\mu/r)}$.

الدورة

$2\pi\sqrt{(a^3/\mu)}$.

الإفلات

$\sqrt{(2\mu/r)}$.

Kepler 3

$T^2 \propto a^3$.

GEO

نصف قطر 42164 km.

اختبار ذاتي

1. السرعة الدائرية هي...

$\sqrt{(\mu/r)}$

μ/r

$\sqrt{(2\mu/r)}$

μr

√(μ/r). الجاذبية = القوة المركزية.

2. سرعة الإفلات تساوي ... ضعف السرعة الدائرية.

2√

2

1

½

2√. الطاقة.

3. يربط قانون كبلر الثالث بين...

T^2 وa^3

T و a

v و r

e و a

T^2 وa^3. القانون التوافقي.

4. دور GEO هو...

يوم نجمي واحد

12 h

90 min

سنة واحدة (1)

يوم نجمي واحد. يطابق الدوران.

أعد هذا الاختبار

كيف يساعد هذا في إنقاذ الكوكب

توضح NOAA أن أقمار الطقس GOES تدور على ارتفاع 22236 ميلًا فوق خط استواء الأرض بسرعة تساوي دوران الأرض، فتبقى فوق المناطق نفسها وتوفر تغطية مستمرة. ويراقب GOES East وGOES West معًا أكثر من نصف الكرة الأرضية، من الساحل الغربي لأفريقيا إلى نيوزيلندا.

يستطيع جهاز التصوير في سلسلة GOES-R تصوير العواصف كل 30 ثانية، وتحمل السلسلة أول راسم برق تشغيلي في المدار الثابت. والارتفاع البالغ 22236 ميلًا هو بالضبط نصف قطر المدار الثابت في هذه الوحدة مطروحًا منه نصف قطر الأرض.

على Saving Planets: رصد الأرض · الفيزياء I

المصادر: NOAA NESDIS: GOES-R Series mission (https://www.goes-r.gov/mission/mission.html)

مصادر تعلّم مجانية

- OpenStax UP1, 13.5 Kepler's laws of planetary motion (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/13-5-keplers-laws-of-planetary-motion): قسم من كتاب مدرسي مجاني.
- OpenStax UP1, 13.4 Satellite orbits and energy (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/13-4-satellite-orbits-and-energy): قسم من كتاب مدرسي مجاني.
- NASA Basics of Space Flight, Chapter 5: Planetary orbits (https://science.nasa.gov/learn/basics-of-space-flight/chapter5-1/): فصل مجاني من NASA.
- PhET: Gravity and Orbits (https://phet.colorado.edu/en/simulations/gravity-and-orbits): المدارات بشكل تفاعلي.

أنهيت هذه الوحدة

القطوع المخروطية والطاقة والعناصر المدارية

حفظ الطاقة والزخم الزاوي، ومعادلة المدار، والقطوع الناقصة والمكافئة والزائدة، والاختلاف المركزي، ومعادلة vis-viva، والسرعتان عند الحضيض والأوج، والعناصر المدارية الكلاسيكية الستة.

أهداف التعلّم

في نهاية هذه الوحدة ستستطيع أن:

- استخدام vis-viva لإيجاد السرعات.
- ربط الاختلاف المركزي بالحضيض والأوج.
- حساب الطاقة النوعية والزخم الزاوي النوعي.
- تسمية العناصر المدارية الستة وتفسيرها.

المفاهيم الأساسية

- الطاقة النوعية ε = v²/2 − μ/r = −μ/(2a) ثابتة: سالبة للقطوع الناقصة، وصفر للقطوع المكافئة، وموجبة للقطوع الزائدة.
- الزخم الزاوي النوعي h = r × v ثابت، لذا يقع المدار في مستوى ثابت.
- تعطي معادلة المدار r = (h²/μ)/(1 + e cos ν) نصف القطر عند الشذوذ الحقيقي ν. والاختلاف المركزي للقطع الناقص e = (r_a − r_p)/(r_a + r_p).
- تعطي معادلة vis-viva v² = μ(2/r − 1/a) السرعة في أي نقطة على أي مدار.
- تحدد ستة عناصر كلاسيكية المدار: نصف المحور الأكبر a، والاختلاف المركزي e، والميل i، والمطلع المستقيم للعقدة الصاعدة Ω، وزاوية الحضيض ω، والشذوذ الحقيقي ν.

المعادلات الأساسية

$$\varepsilon = \frac{v^2}{2} - \frac{\mu}{r} = -\frac{\mu}{2a}$$

=(v^2)/(2)-(μ)/(r)=-(μ)/(2a)

الطاقة النوعية

$$v^2 = \mu\left(\frac{2}{r} - \frac{1}{a}\right)$$

v^2=μ(2r-1a)

Vis-viva

$$r = \frac{h^2/\mu}{1 + e\cos\nu}$$

r=(h^2/μ)/(1+eν)

معادلة المدار

$$e = \frac{r_a - r_p}{r_a + r_p}$$

e=(r_a-r_p)/(r_a+r_p)

الاختلاف المركزي

أمثلة محلولة خطوة بخطوة

مثال 2.1 مدار نصف قطر حضيضه 6778 km ونصف قطر أوجه 42164 km. أوجد a وe.

1. a = (6778 + 42,164)/2 = 24,471 km.
2. e = (42,164 − 6778)/(42,164 + 6778).

الإجابة: a = 24,471 km; e = 0.723.

مثال 2.2 أوجد طاقته النوعية.

1. ε = −3.986 × 10¹⁴/(2 × 2.4471 × 10⁷).

الإجابة: ε = −8.14 MJ/kg.

مثال 2.3 أوجد السرعتين عند الحضيض والأوج.

1. v_p = √(μ(2/r_p − 1/a)).
2. v_a = √(μ(2/r_a − 1/a)).

الإجابة: v_p = 10.07 km/s; v_a = 1.62 km/s.

تمارين

حلّ كلًّا منها على الورق أولًا، ثم تحقق.

1. أوجد h عند الحضيض.

r_p v_p = 6.778 × 10⁶ × 10,066 = 6.82 × 10¹⁰ m²/s.

2. ما قيمة e للدائرة؟

0.

3. ما إشارة ε لمسار الإفلات؟

صفر أو موجبة.

4. أوجد دور المدار أعلاه.

$2\pi\sqrt{(a^3/\mu)} = 10.58$ h.

مفاهيم خاطئة شائعة

خرافة: يتحرك القمر الصناعي بسرعة ثابتة على قطع ناقص.
في الحقيقة: أسرع عند الحضيض، وأبطأ عند الأوج.

خرافة: يُقاس الميل من القطب الشمالي.
في الحقيقة: من مستوى خط الاستواء.

خرافة: تعتمد الطاقة على الاختلاف المركزي.
في الحقيقة: على a فقط.

بطاقات تعليمية

الطاقة

$-\mu/(2a)$.

Vis-viva

$v^2 = \mu(2/r - 1/a)$.

كمية الحركة الزاوية

$h = r \times v$.

معادلة المدار

$r = (h^2/\mu)/(1 + e\cos\nu)$.

الاختلاف المركزي

$(r_a - r_p)/(r_a + r_p)$.

العناصر

$a, e, i, \Omega, \omega, \nu$.

اختبار ذاتي

1. تعطي vis-viva...

مقدار السرعة

الدور

الميل

العقدة

مقدار السرعة. $v^2 = \mu(2/r - 1/a)$.

2. للقطع الناقص...

$\varepsilon < 0$

$\varepsilon = 0$

$\varepsilon > 0$

$e > 1$

$\varepsilon < 0$. مدار مقيد.

3. تكون السرعة أعلى عند...

الحضيض

الأوج

العقدة

كل مكان

الحضيض. كمية الحركة الزاوية.

4. كم عدد العناصر الكلاسيكية؟

6

3

4

9

6. $a, e, i, \Omega, \omega, \nu$.

أعد هذا الاختبار

كيف يساعد هذا في إنقاذ الكوكب

تذكر NASA أن مدار Landsat 9 قريب من القطبي ومتزامن مع الشمس، على ارتفاع 705 km وبميل 98.2°، ودوره 99 دقيقة، أي نحو 14.5 مدارًا في اليوم، ويعبر خط الاستواء اسميًا في الساعة 10:12 صباحًا بالتوقيت المحلي في الممر الهابط.

هذه الأرقام القليلة عناصر مدارية: a من الارتفاع، وe قريب من الصفر، وi = 98.2°، وعقدة مختارة لتثبيت وقت العبور المحلي. وهذه الهندسة الثابتة هي ما يتيح لـ Landsat مقارنة الصور عبر أكثر من خمسة عقود من سجله.

على Saving Planets: رصد الأرض · التفاضل والتكامل 3

المصادر: NASA Science: Landsat 9 (https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-9/landsat-9-overview/)

مصادر تعلّم مجانية

- OpenStax UP1, 13.4 Satellite orbits and energy (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/13-4-satellite-orbits-and-energy): قسم من كتاب مدرسي مجاني.
- MIT OpenCourseWare 16.346 Astrodynamics (Fall 2008) (https://ocw.mit.edu/courses/16-346-astrodynamics-fall-2008/): ملاحظات MIT عن القطوع المخروطية.
- NASA Basics of Space Flight, Chapter 5: Planetary orbits (https://science.nasa.gov/learn/basics-of-space-flight/chapter5-1/): فصل مجاني من NASA.
- PhET: Kepler’s Laws (https://phet.colorado.edu/en/simulations/keplers-laws): القطوع الناقصة بشكل تفاعلي.

أنهيت هذه الوحدة

معادلة كبلر وزمن الطيران

الحركة المتوسطة، والشذوذ المتوسط واللامركزي والحقيقي، ومعادلة كبلر M = E − e sin E، وحلها بطريقة نيوتن، وزمن الطيران بين نقطتين، والموقع في وقت معين.

أهداف التعلّم

في نهاية هذه الوحدة ستستطيع أن:

- ربط الشذوذ المتوسط واللامركزي والحقيقي.
- حل معادلة كبلر تكراريًا.
- إيجاد زمن الطيران بين شذوذين حقيقيين.
- التنبؤ بموقع قمر صناعي في وقت لاحق.

المفاهيم الأساسية

- الحركة المتوسطة n = √(μ/a³) هي المعدل الزاوي المتوسط. ويزداد الشذوذ المتوسط M = n(t − t_p) بانتظام مع الزمن.
- تربط معادلة كبلر الزمن بالهندسة: M = E − e sin E، حيث E الشذوذ اللامركزي.
- يُستنتج الشذوذ الحقيقي من tan(E/2) ((1 + e)/(1 − e)) = tan(ν/2).
- ليس لمعادلة كبلر حل صريح لـ E؛ وطريقة نيوتن E ← E − (E − e sin E − M)/(1 − e cos E) تتقارب في خطوات قليلة.
- زمن الطيران من ν₁ إلى ν₂: أوجد E₁ وE₂، ثم M₁ وM₂، واقسم الفرق على n.

المعادلات الأساسية

$$n = \sqrt{\frac{\mu}{a^3}}$$

n=(μ)/(a^3)

الحركة المتوسطة

$$M = E - e \sin E$$

M=E-e E

معادلة كبلر

$$\tan\frac{\nu}{2} = \sqrt{\frac{1+e}{1-e}}\tan\frac{E}{2}$$

ν2=(1+e)/(1-e) E2

الشذوذ الحقيقي

$$t - t_p = \frac{M}{n}$$

`t-t_p= Mn`

الزمن منذ الحضيض

أمثلة محلولة خطوة بخطوة

مثال 3.1 عند e = 0.3، أوجد M عندما E = π/2.

1. M = 1.5708 − 0.3 × 1.

الإجابة: M = 1.271 rad.

مثال 3.2 عند e = 0.3 وM = 1 rad، حل معادلة كبلر.

1. ابدأ بـ E = 1؛ وطبّق طريقة نيوتن حتى تستقر القيمة.

الإجابة: E = 1.288 rad.

مثال 3.3 أوجد الشذوذ الحقيقي لتلك القيمة من E.

1. tan(ν/2) = √(1.3/0.7) × tan(0.644).

الإجابة: ν = 1.594 rad (91.3°).

تمارين

حلّ كلًّا منها على الورق أولًا، ثم تحقق.

1. كم يستغرق الانتقال من LEO إلى GEO (نصف مدار مدته 10.58 h)؟

   5.29 h.

2. في الدائرة، ما العلاقة بين M وE وν؟

   إنها متساوية.

3. لماذا لا يمكننا حل E مباشرة؟

   معادلة كبلر متسامية.

4. ما الحركة المتوسطة لمدار مدته 92.6 min بالدورات في اليوم؟

   1440/92.56 = 15.56.

مفاهيم خاطئة شائعة

خرافة: يزداد الشذوذ الحقيقي بانتظام مع الزمن.
في الحقيقة: الشذوذ المتوسط هو الذي يزداد بانتظام.

خرافة: تنطبق معادلة كبلر على القطوع الزائدة دون تغيير.
في الحقيقة: تستخدم القطوع الزائدة صيغة زائدية.

خرافة: تحتاج طريقة نيوتن إلى تكرارات كثيرة.
في الحقيقة: عادةً 3–5.

بطاقات تعليمية

الحركة المتوسطة

$n = \sqrt{(\mu/a^3)}$.

الشذوذ المتوسط

$M = n(t - t_p)$.

معادلة كبلر

$M = E - e \sin E$.

الشذوذ الحقيقي

من $\tan(\nu/2)$.

خطوة نيوتن

$E - f/f'$.

زمن الطيران

$\Delta M/n$.

اختبار ذاتي

1. معادلة كبلر هي...

$M = E - e \sin E$

$M = E + e$

$E = \nu$

$n = M/E$

$M = E - e \sin E$. التعريف.

2. الحركة المتوسطة هي...

√(μ/a³)

μ/a

√(μa)

a/μ

√(μ/a³). 2π/T.

3. أي شذوذ يزداد بانتظام؟

المتوسط

الحقيقي

اللامركزي

لا شيء

المتوسط. M = nt.

4. تُحل معادلة كبلر...

تكراريًا

مباشرة

بيانيًا فقط

أبدًا

تكراريًا. طريقة نيوتن.

أعد هذا الاختبار

كيف يساعد هذا في إنقاذ الكوكب

تفيد NASA بأن القمير Dimorphos كان يستغرق قبل اصطدام DART مدة 11 ساعة و55 دقيقة للدوران حول كويكبه الأم Didymos، وأن الدور بعد الاصطدام في 26 سبتمبر 2022 أصبح 11 ساعة و23 دقيقة، أي تغيرًا قدره 32 دقيقة (بعدم يقين نحو ±2

دقيقة).

قاس علماء الفلك هذا التغير بتوقيت مدار القمير من تلسكوبات على الأرض: فقوانين كبلر تحوّل إزاحة زمنية صغيرة إلى دليل على تغيّر المدار.

على Saving Planets: التفاضل والتكامل 2 · رصد الأرض

المصادر: NASA: NASA Confirms DART Mission Impact Changed Asteroid’s Motion in Space (Oct. 11, 2022) (https://www.nasa.gov/news-release/nasa-confirms-dart-mission-impact-changed-asteroids-motion-in-space/)

مصادر تعلّم مجانية

- MIT OpenCourseWare 16.346 Astrodynamics (Fall 2008) (https://ocw.mit.edu/courses/16-346-astrodynamics-fall-2008/): ملاحظات MIT عن معادلة كبلر.
- OpenStax UP1, 13.5 Kepler’s laws of planetary motion (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/13-5-keplers-laws-of-planetary-motion): قسم من كتاب مدرسي مجاني.
- NASA Basics of Space Flight, Chapter 5: Planetary orbits (https://science.nasa.gov/learn/basics-of-space-flight/chapter5-1/): فصل مجاني من NASA.
- MIT OpenCourseWare 16.07 Dynamics (Fall 2009) (https://ocw.mit.edu/courses/16-07-dynamics-fall-2009/): ملاحظات MIT في الديناميكا.

أنهيت هذه الوحدة

الانتقالات المدارية: هوهمان وما بعده

المناورات الدفعية وΔv، وانتقال هوهمان بين مدارات دائرية، وزمن الانتقال، والانتقالات ثنائية القطع الناقص، والطور والالتقاء، ورفع المدارات وخفضها.

أهداف التعلّم

في نهاية هذه الوحدة ستستطيع أن:

- حساب Δv لانتقال هوهمان.
- إيجاد زمن الانتقال.
- شرح متى توفر الانتقالات ثنائية القطع الناقص Δv.
- تخطيط مناورة طور بسيطة.

المفاهيم الأساسية

- يغيّر الاحتراق الدفعي السرعة فورًا بمقدار Δv؛ ويُستنتج المدار بعد الاحتراق من vis-viva.
- يستخدم انتقال هوهمان قطعًا ناقصًا مماسًا للدائرتين: احتراق في المدار الداخلي لدخول القطع الناقص، ثم احتراق آخر عند الأوج لتدوير المدار.
- زمن الانتقال يساوي نصف دور قطع الانتقال الناقص.
- عند نسب أنصاف أقطار كبيرة جدًا (أعلى من نحو 11.9)، قد يستهلك الانتقال ثنائي القطع الناقص بثلاثة احتراقات Δv أقل، على حساب وقت أطول بكثير.
- الطور: للحاق بهدف في المدار نفسه، ادخل مدارًا أصغر أو أكبر قليلًا لدورة أو أكثر، ثم عُد.

المعادلات الأساسية

$$\Delta v_1 = \sqrt{\mu\left(\frac{2}{r_1} - \frac{1}{a}\right)} - \sqrt{\frac{\mu}{r_1}}$$

```
Δ v_1=μ(2r_1-1a)-μr_1
```

الاحتراق الأول

$$\Delta v_2 = \sqrt{\frac{\mu}{r_2}} - \sqrt{\mu\left(\frac{2}{r_2} - \frac{1}{a}\right)}$$

```
Δ v_2=μr_2-μ(2r_2-1a)
```

الاحتراق الثاني

$$a = \frac{r_1 + r_2}{2}$$

```
a=(r_1+r_2)/(2)
```

$$t = \pi\sqrt{\frac{a^3}{\mu}}$$

t=π(a^3)/(μ)

زمن الانتقال

أمثلة محلولة خطوة بخطوة

مثال 4.1 أوجد Δv لانتقال هوهمان من مدار دائري على ارتفاع 400 km إلى GEO (في المستوى نفسه).

1. $\Delta v_1 = 10.066 - 7.669 = 2.398$ km/s.
2. $\Delta v_2 = 3.075 - 1.618 = 1.456$ km/s.

الإجابة: Δv الكلي = 3.85 km/s.

مثال 4.2 إيجاد زمن الانتقال.

1. $t = \pi\sqrt{(24{,}471{,}000^3/\mu)}$.

الإجابة: t = 5.29 h.

مثال 4.3 احتراق للخروج من المدار عند 700 km يخفض الحضيض إلى 200 km. أوجد Δv.

1. $v_c = \sqrt{(\mu/7078\ \text{km})}$.
2. v_a على القطع الناقص 6578 km × 7078 من vis-viva.

الإجابة: Δv = 139 m/s.

تمارين

حلّ كلًّا منها على الورق أولًا، ثم تحقق.

1. أي احتراق أكبر في انتقال هوهمان من LEO إلى GEO؟

   الأول، 2.40 km/s.

2. فوق أي نسبة أنصاف أقطار يمكن أن يتفوق الانتقال ثنائي القطع الناقص؟

   نحو 11.9.

3. للحاق بهدف متقدم في المدار نفسه، هل تصعد أم تنخفض؟

تنخفض (دور أقصر).

4. في أي اتجاه تحترق لخفض مدار؟

عكس اتجاه الحركة.

مفاهيم خاطئة شائعة

خرافة: لتسرع في المدار، احترق إلى الأمام وستبقى أسرع.
في الحقيقة: رفع المدار يجعلك أبطأ إجمالًا.

خرافة: انتقال هوهمان هو الأرخص دائمًا.
في الحقيقة: ليس عند النسب الكبيرة جدًا.

خرافة: زمن الانتقال دور كامل.
في الحقيقة: نصف دور.

بطاقات تعليمية

Δv

تغير السرعة.

هوهمان

احتراقان مماسيان.

a للانتقال

$(r_1 + r_2)/2$.

زمن الانتقال

$\pi\sqrt{(a^3/\mu)}$.

ثنائي القطع الناقص

ثلاثة احتراقات، نسب كبيرة.

الطور

انخفض لتلحق.

اختبار ذاتي

1. يستخدم انتقال هوهمان ... احتراقات.

2

1

3

4

2. احتراقات مماسية.

2. زمن الانتقال هو...

نصف دور الانتقال

دور كامل

صفر

يوم واحد

نصف دور الانتقال. من الحضيض إلى الأوج.

3. للحاق بهدف متقدم، يجب أن تتجه...

أدنى

أعلى

قطبيًا

في أي مكان

أدنى. دور أقصر.

4. قيمة a لقطع الانتقال الناقص هي...

$(r_1 + r_2)/2$

r_1r_2

$r_2 - r_1$

$\sqrt{(r_1r_2)}$

$(r_1 + r_2)/2$. قطع ناقص مماسي.

أعد هذا الاختبار

كيف يساعد هذا في إنقاذ الكوكب

اعتمدت FCC في سبتمبر 2022 قاعدة تُلزم مشغلي الأقمار الصناعية في المدار الأرضي المنخفض بالتخلص من أقمارهم خلال 5 سنوات من انتهاء بعثاتها (Report and Order FCC-22-74).

احتراق الخروج من المدار ليس سوى نصف مناورة من نوع هوهمان: خفض الحضيض إلى الغلاف الجوي العلوي ليكمل السحب المهمة. فمن 700 km، لا يحتاج خفض الحضيض إلى 200 km إلا نحو 139 m/s في مثال هذه الوحدة.

على Saving Planets: الديناميكا · الحلول

المصادر: FCC: FCC Adopts New ‘5-Year Rule’ for Deorbiting Satellites (Report and Order FCC-22-74) (https://www.fcc.gov/document/fcc-adopts-new-5-year-rule-deorbiting-satellites-0)

مصادر تعلّم مجانية

- MIT OpenCourseWare 16.346 Astrodynamics (Fall 2008) (https://ocw.mit.edu/courses/16-346-astrodynamics-fall-2008/): ملاحظات MIT عن الانتقالات.
- NASA: Basics of Space Flight (https://science.nasa.gov/learn/basics-of-space-flight/): دليل مجاني من NASA.
- OpenStax UP1, 13.4 Satellite orbits and energy (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/13-4-satellite-orbits-and-energy): قسم من كتاب مدرسي مجاني.
- NASA’s Eyes on the Solar System (https://eyes.nasa.gov/apps/solar-system/): مسارات حقيقية.

☐ **أنهيت هذه الوحدة**

تغيير المستوى والمناورات المركبة

تغيير الميل والعقدة، وΔv لتغيير المستوى البسيط، ولماذا يكون تغيير المستوى مكلفًا في المدار المنخفض، والجمع بين تغيير المستوى واحتراق هوهمان، وخط عرض موقع الإطلاق.

أهداف التعلّم

في نهاية هذه الوحدة ستستطيع أن:

- حساب Δv لتغيير مستوى بسيط.
- الجمع بين تغيير المستوى واحتراق التدوير.
- شرح لماذا يُجرى تغيير المستوى على ارتفاع عالٍ.
- ربط خط عرض الإطلاق بالميل الأدنى.

المفاهيم الأساسية

- تدوير مستوى المدار بمقدار Δi عند السرعة v يكلّف Δv = 2v sin(Δi/2)، دون تغيير مقدار السرعة.
- لأن الكلفة تتناسب مع السرعة، يكون تغيير المستوى أرخص حيث تكون المركبة أبطأ: عند الأوج أو في المدارات العالية.
- الجمع بين تغيير المستوى وتغيير السرعة في احتراق واحد يستخدم قانون جيب التمام: Δv = √(v₁² + v₂² − 2v₁v₂ cos Δi)، وهو أرخص من إجرائهما منفصلين.
- يبلغ الإطلاق المباشر ميلًا لا يقل عن خط عرض موقع الإطلاق، لذا يجب على أقمار GEO المطلقة من خطوط العرض المتوسطة إزالة الميل لاحقًا.
- يستخدم تغيير العقدة والتغيير المركب للميل والعقدة فكرة مثلث السرعات نفسها مع حساب المثلثات الكروي.

المعادلات الأساسية

$$\Delta v = 2v \sin \frac{\Delta i}{2}$$

```
Δ v=2v(Δ i)/(2)
```

تغيير مستوى بسيط

$$\Delta v = \sqrt{v_1^2 + v_2^2 - 2 v_1 v_2 \cos \Delta i}$$

```
Δ v=_1^2+v_2^2-2v_1v_2Δ i
```

مناورة مركبة

$$i_{min} = \phi_{launch}$$

```
i_min=_launch
```

أدنى ميل مباشر

$$\cos i = \cos\phi \sin\beta$$

سمت الإطلاق β

أمثلة محلولة خطوة بخطوة

مثال 5.1 أوجد Δv لإزالة 28.5° من الميل في GEO (v = 3.075 km/s).

1. Δv = 2 × 3.075 × sin 14.25°.

الإجابة: Δv = 1.51 km/s.

مثال 5.2 اجمع تغيير المستوى هذا مع احتراق التدوير في GEO (v_a = 1.618 km/s).

1. Δv = √(1.618² + 3.075² − 2 × 1.618 × 3.075 × cos 28.5°).

الإجابة: Δv = 1.82 km/s، بتوفير 1.15 km/s مقارنة بالاحتراقات المنفصلة (1.46 + 1.51).

مثال 5.3 أوجد كلفة تغيير مستوى بمقدار 10° في مدار على ارتفاع 400 km.

1. Δv = 2 × 7.669 × sin 5°.

الإجابة: Δv = 1.34 km/s.

تمارين

حلّ كلًّا منها على الورق أولًا، ثم تحقق.

1. ما Δv الكلي من LEO إلى GEO مع الاحتراق النهائي المركب؟

   1.82 + 2.40 = 4.22 km/s.

2. أين أرخص مكان لتغيير المستوى على قطع ناقص؟

   عند الأوج.

3. تغيير مستوى بمقدار 60° يكلف كم ضعفًا من v؟

   v × 1 = 2 sin 30°.

4. هل يمكن لإطلاق مباشر من خط عرض 28.5° بلوغ ميل 0°؟

   No.

مفاهيم خاطئة شائعة

خرافة: تغيير المستوى رخيص.
في الحقيقة: في LEO، تكلف 10° مقدار 1.34 km/s.

خرافة: الاحتراقات المنفصلة جيدة كالمركبة.
في الحقيقة: الاحتراقات المركبة توفر Δv.

خرافة: يمكن لأي موقع إطلاق بلوغ أي ميل مباشرة.
في الحقيقة: ليس دون خط عرضه.

بطاقات تعليمية

تغيير المستوى

2v sin(Δi/2).

مركب

قانون جيب التمام.

أين

عند السرعة المنخفضة.

خط عرض الإطلاق

أدنى ميل.

تغيير العقدة

حساب المثلثات الكروي.

GEO

أزل الميل عند الأوج.

اختبار ذاتي

1. تغيير المستوى البسيط يكلف...

2v sin(Δi/2)

vΔi²

v cos Δi

0

2v sin(Δi/2). مثلث السرعات.

2. أفضل مكان لتغيير المستوى...

الأوج

الحضيض

العقدة فقط

أي مكان

الأوج. أدنى سرعة.

3. الاحتراقات المركبة...

أرخص

أغلى

كما هي

مستحيل

أرخص. قانون جيب التمام.

4. أدنى ميل مباشر يساوي...

خط عرض الإطلاق

0

90°

خط الطول

خط عرض الإطلاق. الهندسة.

أعد هذا الاختبار

كيف يساعد هذا في إنقاذ الكوكب

تذكر صفحة Landsat 9 لدى NASA أن القمر أُطلق إلى مدار Landsat 7 للحفاظ مع Landsat 8 على تغطية متكررة كل 8 أيام، وأن المركبة تحمل وقودًا يكفي للعمل 10 سنوات على الأقل مقابل عمر تصميمي قدره 5 سنوات.

وضع قمر صناعي بدقة في مستوى مدار قمر آخر وإبقاؤه هناك هو عمل تغيير المستوى والطور. والوقود الموفَّر بحسن تخطيط المناورات يتحول إلى سنوات إضافية من بيانات الأرض المجانية.

على Saving Planets: رصد الأرض · الجير الخطي

المصادر: NASA Science: Landsat 9 (https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-9/landsat-9-overview/)

مصادر تعلّم مجانية

- MIT OpenCourseWare 16.346 Astrodynamics (Fall 2008) (https://ocw.mit.edu/courses/16-346-astrodynamics-fall-2008/): ملاحظات MIT عن تغيير المستوى.
- NASA: Basics of Space Flight (https://science.nasa.gov/learn/basics-of-space-flight/): دليل مجاني من NASA.
- MIT OpenCourseWare 16.07 Dynamics (Fall 2009) (https://ocw.mit.edu/courses/16-07-dynamics-fall-2009/): الديناميكا في MIT.
- OpenStax UP1, 13.4 Satellite orbits and energy (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/13-4-satellite-orbits-and-energy): قسم من كتاب مدرسي مجاني.

أنهيت هذه الوحدة

الصواريخ وميزانيات Δv والمراحل

معادلة الصاروخ لتسيولكوفسكي، والدفع النوعي وسرعة العادم، ونسبة الكتلة وكسر الوقود الدافع، وقوة الدفع، والمراحل، وخسائر الجاذبية والسحب أثناء الصعود، وبناء ميزانية Δv للبعثة.

أهداف التعلّم

في نهاية هذه الوحدة ستستطيع أن:

- تطبيق معادلة الصاروخ.
- ربط الدفع النوعي وسرعة العادم وقوة الدفع.
- بيان لماذا تفيد المراحل.
- بناء ميزانية Δv بسيطة.

المفاهيم الأساسية

- معادلة الصاروخ: Δv = I_sp g₀ ln(m₀/m_f)، حيث m₀/m_f نسبة الكتلة. وسرعة العادم v_e = I_sp g₀.
- قوة الدفع F = ṁ v_e = ṁ I_sp g₀.
- لأن Δv يزداد فقط مع لوغاريتم نسبة الكتلة، فإن صاروخًا بمرحلة واحدة إلى المدار يحتاج أن تكون معظم كتلته وقودًا دافعًا. وتتخلص المراحل من الخزانات الفارغة والمحركات فتدفع المراحل اللاحقة كتلة ميتة أقل.
- يتطلب بلوغ المدار المنخفض عمليًا نحو 9.3–10 km/s من Δv (نطاق مرجعي): نحو 7.7–7.8 km/s سرعةً مدارية إضافة إلى خسائر الجاذبية والسحب، ناقص الدفعة من دوران الأرض في الإطلاقات نحو الشرق.
- تجمع ميزانية Δv للبعثة كل مناورة: الإطلاق والانتقالات وتغييرات المستوى والحفاظ على الموقع والتخلص، إضافة إلى هامش.

المعادلات الأساسية

$$\Delta v = I_{sp} g_0 \ln \frac{m_0}{m_f}$$

```
Δ v=I_spg_0(m_0)/(m_f)
```

معادلة الصاروخ

$$v_e = I_{sp} g_0$$

```
v_e=I_spg_0
```

سرعة العادم

$$F = \dot{m}\, I_{sp} g_0$$

```
F= m I_spg_0
```

الدفع

$$\frac{m_0}{m_f} = e^{\Delta v / (I_{sp} g_0)}$$

`(m_0)/(m_f)=e^Δ v/(I_spg_0)`

نسبة الكتلة المطلوبة

أمثلة محلولة خطوة بخطوة

مثال 6.1 مرحلة لها $I_{sp} = 300$ s ونسبة كتلة 4. أوجد Δv.

1. $\Delta v = 300 \times 9.80665 \times \ln 4$.

الإجابة: $\Delta v = 4.08$ km/s.

مثال 6.2 ما نسبة الكتلة التي تعطي 9.4 km/s مع $I_{sp} = 350$ s في مرحلة واحدة؟

1. $m_0/m_f = \exp(9400/(350 \times 9.80665))$.

الإجابة: 15.5، أي إن 93.5% من كتلة الإقلاع وقود دافع.

مثال 6.3 مرحلتان، لكل منهما $I_{sp} = 300$ s ونسبة كتلة 3. ما Δv الكلي؟

1. $\Delta v = 2 \times 300 \times 9.80665 \times \ln 3$.

الإجابة: $\Delta v = 6.46$ km/s.

تمارين

حلّ كلًّا منها على الورق أولًا، ثم تحقق.

1. أوجد قوة الدفع عند $\dot{m} = 100$ kg/s و$I_{sp} = 300$ s.

   294 kN.

2. أوجد v_e عند $I_{sp} = 450$ s.

   4.41 km/s.

3. ضاعف نسبة الكتلة من 4 إلى 8. ما Δv؟

   يرتفع بمقدار $300 \times 9.807 \times \ln 2 = 2.04$ km/s، ولا يتضاعف.

4. لماذا تفيد المراحل؟

المراحل اللاحقة لا تحمل خزانات فارغة.

مفاهيم خاطئة شائعة

خرافة: مضاعفة الوقود الدافع تضاعف Δv.
في الحقيقة: يزداد Δv مع لوغاريتم نسبة الكتلة.

خرافة: يُقاس I_{sp} بوحدة m/s.
في الحقيقة: بالثواني؛ $v_e = I_{sp} g_0$.

خرافة: المدار يحتاج 7.7 km/s فقط.
في الحقيقة: تضيف الخسائر 1.5–2 km/s.

بطاقات تعليمية

معادلة الصاروخ

$\Delta v = v_e \ln(m_0/m_f)$.

I_{sp}

ثوانٍ؛ v_e/g_0.

الدفع

$\dot{m}\, v_e$.

نسبة الكتلة

m_0/m_f.

التقسيم إلى مراحل

التخلص من الكتلة الفارغة.

ميزانية Δv

مجموع كل المناورات + هامش.

اختبار ذاتي

1. $\Delta v =$ ...

$I_{sp}\, g_0 \ln(m_0/m_f)$

$I_{sp}\, m_0$

$g_0\, m_f$

m_0/m_f

$I_{sp}\, g_0 \ln(m_0/m_f)$. تسيولكوفسكي.

2. قوة الدفع = ...

$\dot{m}\, I_{sp}\, g_0$

$m\, g_0$

$I_{sp}/\dot{m}$

$\Delta v/t$

$\dot{m}\, I_{sp}\, g_0$. تدفق كمية الحركة.

3. تفيد المراحل عبر...

التخلص من الكتلة الميتة

إضافة الوقود

رفع g_0

لا شيء

التخلص من الكتلة الميتة. نسبة الكتلة.

4. Δv إلى المدار المنخفض نحو...

9.4 km/s

3 km/s

20 km/s

1 km/s

9.4 km/s. مع الخسائر.

أعد هذا الاختبار

كيف يساعد هذا في إنقاذ الكوكب

تفيد NASA بأن DART أُطلق في 24 نوفمبر 2021 (EST) على صاروخ SpaceX Falcon 9 من قاعدة Vandenberg التابعة لقوة الفضاء في كاليفورنيا، واصطدم في 26 سبتمبر 2022 بـ Dimorphos، وهو قمير قطره 160 مترًا فقط يدور حول الكويكب Didymos البالغ قطره 780 مترًا.

تشير NASA إلى أن الاصطدام وقع بسرعة نحو 22530 km/h. وإيصال مركبة إلى هناك بتلك السرعة وعلى المسار الصحيح بدأ بميزانية Δv في هذه الوحدة.

على Saving Planets: الديناميكا الحرارية · مقدمة في هندسة الطيران والفضاء

المصادر: NASA: NASA · NASA Science: Double Asteroid Redirection Test (DART) (https://science.nasa.gov/mission/dart/) Confirms DART Mission Impact Changed Asteroid's Motion in Space (Oct. 11, 2022) (https://www.nasa.gov/news-release/nasa-confirms-dart-mission-impact-changed-asteroids-motion-in-space/)

مصادر تعلّم مجانية

- OpenStax UP1, 9.7 Rocket propulsion (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/9-7-rocket-propulsion): قسم من كتاب مدرسي مجاني.
- NASA Glenn: Rocket thrust (https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/rocket/rktpow.html): صفحة مجانية من NASA.
- NASA: Basics of Space Flight (https://science.nasa.gov/learn/basics-of-space-flight/): دليل مجاني من NASA.
- MIT OpenCourseWare 16.346 Astrodynamics (Fall 2008) (https://ocw.mit.edu/courses/16-346-astrodynamics-fall-2008/): ملاحظات MIT.

أنهيت هذه الوحدة

الاضطرابات: انتفاخ الأرض والسحب والمدارات المتزامنة مع الشمس

لماذا تنجرف المدارات الحقيقية، وتفلطح الأرض وJ₂، وتراجع العقدة ودوران الحضيض، والمدارات المتزامنة مع الشمس، والمدارات المجمدة وذات الميل الحرج، والسحب الجوي وتضاؤل المدار، وتأثيرات الجسم الثالث وضغط الإشعاع الشمسي.

أهداف التعلّم

في نهاية هذه الوحدة ستستطيع أن:

- حساب تراجع العقدة الناتج عن J_2.
- إيجاد الميل لمدار متزامن مع الشمس.
- شرح تضاؤل المدار بفعل السحب.
- تسمية اضطرابات أخرى.

المفاهيم الأساسية

- تنتفخ الأرض عند خط الاستواء. ويجعل حدّها (1.0826×10^{-3} J_2 مستوى المدار يتحرك حركة مبادرة: $d\Omega/dt = -1.5\, n\, J_2\, (R/p)^2 \cos i$، حيث $p = a(1 - e^2)$.
- تتراجع المدارات المباشرة ($i < 90°$) نحو الغرب؛ وتتقدم المدارات التراجعية ($i > 90°$) نحو الشرق.
- يختار المدار المتزامن مع الشمس قيمة i بحيث يتقدم المستوى 360° في السنة، أي نحو 0.9856° يوميًا، فيحافظ على الوقت الشمسي المحلي نفسه عند كل مرور.
- في المدار المنخفض يزيل السحب الجوي الطاقة ببطء ويخفض المدار حتى تعود المركبة إلى الغلاف الجوي. ويزداد السحب بحدة عندما يسخّن النشاط الشمسي الغلاف الجوي العلوي.
- اضطرابات أخرى: جاذبية القمر والشمس (مهمة في GEO)، وضغط الإشعاع الشمسي، والتوافقيات العليا للجاذبية.

المعادلات الأساسية

$$\dot{\Omega} = -\frac{3}{2} n J_2 \left(\frac{R}{p}\right)^2 \cos i$$

```
=-32nJ_2( Rp)^2 i
```

تراجع العقدة

$$\dot{\Omega}_{SS} = \frac{360^\circ}{365.2422\ \mathrm{d}}$$

```
_SS=360°365.2422\ d
```

معدل التزامن مع الشمس

$$\cos i = -\frac{\dot{\Omega}_{SS}}{1.5 n J_2 (R/p)^2}$$

```
i=-_SS1.5nJ_2(R/p)^2
```

$$n = \sqrt{\mu / a^3}$$

n=μ/a^3

الحركة المتوسطة

أمثلة محلولة خطوة بخطوة

مثال 7.1 أوجد الميل لمدار دائري متزامن مع الشمس على ارتفاع 705 km.

1. $r = 7083\ \text{km};\ n = \sqrt{(\mu / r^3)}$.
2. المعدل المطلوب $0.9856°/\text{يوم} = 1.991 \times 10^{-7}\ \text{rad/s}$.
3. $\cos i = -\text{rate} / (1.5 n J_2 (R/r)^2)$.

الإجابة: $i = 98.2°$، وهو تمامًا ميل Landsat 9.

مثال 7.2 تحقق من معدل العقدة لـ Landsat 9 (705 km، 98.2°).

1. $d\Omega/dt = -1.5 n J_2 (R/r)^2 \cos 98.2°$.

الإجابة: $+0.985°$ يوميًا، مطابقًا لـ $0.9856°$ يوميًا التي تتحركها الشمس.

مثال 7.3 أوجد تراجع العقدة لمدار على ارتفاع 400 km بميل 51.6°.

1. المعادلة نفسها مع $r = 6778\ \text{km}$ و$\cos 51.6°$.

الإجابة: $-5.00°$ يوميًا (نحو الغرب).

تمارين

حلّ كلًّا منها على الورق أولًا، ثم تحقق.

1. هل المدار المتزامن مع الشمس مباشر أم تراجعي؟

   تراجعي قليلًا ($i > 90°$).

2. ماذا يفعل J_2 بالمدار القطبي ($i = 90°$)؟

   لا شيء بالعقدة: $\cos 90° = 0$.

3. لماذا تحتاج الأقمار المنخفضة إلى رفع مداري؟

السحب يخفضها.

4. أي اضطراب أهم لميل GEO؟

جاذبية القمر والشمس.

مفاهيم خاطئة شائعة

خرافة: مستويات المدارات ثابتة في الفضاء.
في الحقيقة: J_2 يجعلها تتحرك حركة مبادرة.

خرافة: التزامن مع الشمس يعني أن القمر يرى الشمس طوال الوقت.
في الحقيقة: يعني الوقت الشمسي المحلي نفسه عند كل مرور.

خرافة: السحب مهم فقط تحت 100 km.
في الحقيقة: إنه يشكّل المدارات حتى عدة مئات من km.

بطاقات تعليمية

J_2

1.0826×10^{-3}.

معدل العقدة

$-1.5nJ_2(R/p)^2 \cos i$.

متزامن مع الشمس

+0.9856°/يوم.

العقدة التراجعية

تتقدم نحو الشرق.

السحب

التضاؤل والعودة إلى الغلاف الجوي.

اضطراب GEO

الشمس والقمر.

اختبار ذاتي

1. يسبب J_2...

مبادرة العقدة

الإفلات

كتلة أكبر

لا شيء

مبادرة العقدة. التفلطح.

2. معدل العقدة للتزامن مع الشمس...

0.9856°/ يوم

0

360°/ يوم

1°/ ساعة

0.9856°/يوم. دورة واحدة في السنة.

3. ميول التزامن مع الشمس...

أكبر قليلًا من 90°

قريبة من 0°

45°

28.5°

أكبر قليلًا من 0 > cos i .90°.

4. يجعل السحب مدارات LEO...

تتضاءل

تكبر

تبقى ثابتة

تميل

تتضاءل. فقدان الطاقة.

أعد هذا الاختبار

كيف يساعد هذا في إنقاذ الكوكب

تذكر NASA أن Landsat 9 في مدار قريب من القطبي ومتزامن مع الشمس على ارتفاع 705 km وبميل 98.2°، ويعبر خط الاستواء نحو الساعة 10:12 صباحًا بالتوقيت المحلي. ويصوّر Landsat 9 وLandsat 8 معًا المكان نفسه كل 8 أيام، ما يتيح تنبيهات شبه أسبوعية بإزالة الغابات ورصد جودة المياه وتقارير المحاصيل.

تشير NASA إلى أن بيانات Landsat العامة المجانية أسهمت بما يقدّر بـ 25.6 مليار دولار في الاقتصاد الأمريكي في 2023. والضوء الصباحي الثابت الذي يجعل تلك الصور قابلة للمقارنة ينبع مباشرة من J_2 وشرط التزامن مع الشمس في هذه الوحدة.

على Saving Planets: رصد الأرض · المحيطات

المصادر: NASA Science: Landsat 9 (https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-9/landsat-9-overview/)

مصادر تعلّم مجانية

- MIT OpenCourseWare 16.346 Astrodynamics (Fall 2008) (https://ocw.mit.edu/courses/16-346-astrodynamics-fall-20 08/): ملاحظات MIT عن الاضطرابات.
- NASA Basics of Space Flight, Chapter 5: Planetary orbits (https://science.nasa.gov/learn/basics-of-space-flight/cha pter5-1/): فصل مجاني من NASA.
- NASA Science: Landsat 9 (https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-9/landsat-9-overview/): حقائق مدار Landsat 9.
- MIT OpenCourseWare 16.07 Dynamics (Fall 2009) (https://ocw.mit.edu/courses/16-07-dynamics-fall-2009/): الديناميكا في MIT.

☐ أنهيت هذه الوحدة

المسارات الأرضية والتغطية والكوكبات

المسارات الأرضية وانزياحها غربًا في كل مدار، ومدارات المسار الأرضي المتكرر، وعرض النطاق وزمن إعادة الزيارة، والتغطية من GEO، وتصميم الكوكبات لإعادة الزيارة والتغطية.

أهداف التعلّم

في نهاية هذه الوحدة ستستطيع أن:

- حساب انزياح المسار الأرضي في كل مدار.
- إيجاد عدد المدارات في كل دورة تكرار.
- ربط عرض النطاق بإعادة الزيارة.
- شرح لماذا يقسم قمران زمن إعادة الزيارة على اثنين.

المفاهيم الأساسية

- مع دوران الأرض تحت المدار، ينزاح كل مسار أرضي غربًا بمقدار Δλ = 360° × T/T_sidereal في كل مدار.
- مدار المسار الأرضي المتكرر يكمل عددًا صحيحًا من المدارات في عدد صحيح من الأيام، فيتكرر النمط تمامًا.
- يغطي مستشعر عرض نطاقه w خط الاستواء في نحو (المحيط)w/ مرورًا، وهذا يحدد أدنى دورة تكرار.
- إضافة أقمار في المدار نفسه بتباعد متساوٍ يقسم زمن إعادة الزيارة.
- يرى قمر GEO واحد نحو 40% من سطح الأرض (قيمة مرجعية)، لكن بدقة منخفضة قرب الأطراف؛ وبضعة أقمار موزعة حول خط الاستواء تغطي كل خطوط الطول عدا المناطق القطبية.

المعادلات الأساسية

$$\Delta\lambda = 360^\circ \frac{T}{T_{sid}}$$

```
Δ=360°_sid
```

انزياح المسار الأرضي

$$kT = jT_{day}$$

```
kT=jT_day
```

شرط التكرار

$$N_{pass} \approx \frac{2\pi R}{w}$$

عدد المرورات لتغطية خط الاستواء

$$t_{revisit} = \frac{t_{repeat}}{N_{sat}}$$

`t_revisit=_repeatN_sat`

إعادة زيارة الكوكبة

أمثلة محلولة خطوة بخطوة

مثال 8.1 أوجد انزياح المسار الأرضي في كل مدار لمدار مدته 98.87 min.

1. Δλ = 360 × 98.87 × 60/86,164.1.

الإجابة: Δλ = 24.8°، أي نحو 2760 km عند خط الاستواء.

مثال 8.2 كم مدارًا يكمل ذلك القمر في 16 يومًا؟

1. 16 × 14.564.

الإجابة: نحو 233 مدارًا، لذا تناسبه دورة تكرار مدتها 16 يومًا.

مثال 8.3 قمران متطابقان يتشاركان مدار تكرار مدته 16 يومًا بتباعد متساوٍ. ما زمن إعادة الزيارة؟

1. 16/2.

الإجابة: 8 أيام، كما تذكر NASA لـ Landsat 8 و9.

تمارين

حلّ كلًّا منها على الورق أولًا، ثم تحقق.

1. كم نطاقًا بعرض 185 km يغطي خط الاستواء (40075 km)؟

   40075/185 = 216.6، أي نحو 217.

2. لماذا تنزاح المسارات الأرضية غربًا؟

   الأرض تدور شرقًا تحت المدار.

3. كيف يبدو المسار الأرضي لقمر GEO؟

   نقطة (أو شكل ثمانية صغير إذا كان مائلًا).

4. كيف تغيّر ثلاثة أقمار إعادة الزيارة البالغة 16 يومًا؟

   نحو 5.33 أيام.

مفاهيم خاطئة شائعة

خرافة: تتكرر المسارات الأرضية كل مدار.
في الحقيقة: فقط بعد دورة تكرار كاملة.

خرافة: الارتفاع الأكبر يعني دائمًا تغطية أفضل.
في الحقيقة: الدقة تنخفض مع الارتفاع.

خرافة: GEO يرى الأرض كلها.
في الحقيقة: نحو 40%، وبشكل ضعيف قرب القطبين.

بطاقات تعليمية

انزياح المسار

360°T/T_sid.

مدار التكرار

kT = jT_day.

النطاق

العرض المصوَّر.

إعادة الزيارة

التكرارN_sat/.

الرؤية من GEO

40% ≈ من الأرض.

الكوكبة

أقمار متباعدة.

اختبار ذاتي

1. تنزاح المسارات الأرضية...

الغرب

الشرق

الشمال

لا يزداد إطلاقًا

الغرب. الأرض تدور شرقًا.

2. الانزياح في كل مدار هو…

360°T/T_sid

T/360

0

15°

360°T/T_sid. دوران الأرض.

3. قمران متباعدان بالتساوي…

ينصّفان زمن إعادة الزيارة

يضاعفان زمن إعادة الزيارة

لا تغيير

يضاعفانه أربع مرات

ينصّفان زمن إعادة الزيارة. التباعد.

4. لمدار التكرار…

مدارات كاملة في أيام كاملة

e = 1

i = 0

T = 1 يوم فقط

مدارات كاملة في أيام كاملة. التعريف.

أعد هذا الاختبار

كيف يساعد هذا في إنقاذ الكوكب

تفيد NASA بأن لـ Landsat 9 دورة تكرار مدتها 16 يومًا بنطاق عرضه 185 km، ويجمع نحو 740 مشهدًا يوميًا (قرابة ضعف المطلوب البالغ 400 مشهد)، ويرصد مع Landsat 8 الموقع نفسه كل 8 أيام.

تشير NOAA إلى أن GOES East وGOES West معًا يغطيان أكثر من نصف الكرة الأرضية من المدار الثابت. تعطي المدارات القطبية المنخفضة خرائط حادة ومتكررة؛ ويعطي GEO مراقبة مستمرة. والرصد الجيد للأرض يستخدم الاثنين.

على Saving Planets: رصد الأرض · المحيطات

المصادر: NOAA NESDIS · NASA Science: Landsat 9 (https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-9/landsat-9-overview/) · GOES-R Series mission (https://www.goes-r.gov/mission/mission.html)

مصادر تعلّم مجانية

- NASA Science: Landsat 9 (https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-9/landsat-9-overview/): حقائق تغطية Landsat 9.
- NOAA NESDIS: GOES-R Series mission (https://www.goes-r.gov/mission/mission.html): حقائق NOAA عن GOES-R.
- NASA: Basics of Space Flight (https://science.nasa.gov/learn/basics-of-space-flight/): دليل مجاني من NASA.
- MIT OpenCourseWare 16.346 Astrodynamics (Fall 2008) (https://ocw.mit.edu/courses/16-346-astrodynamics-fall-20 08/): ملاحظات MIT.

أنهيت هذه الوحدة

الانتقالات بين الكواكب والقطوع المخروطية الموصولة

انتقالات هوهمان حول الشمس، وزمن الانتقال إلى المريخ، وv_∞ وC_3 عند المغادرة، وطريقة القطوع المخروطية الموصولة، ومجالات التأثير، والإفلات من مدار انتظار، والأدوار الاقترانية ونوافذ الإطلاق، ومساعدات الجاذبية.

أهداف التعلّم

في نهاية هذه الوحدة ستستطيع أن:

- حساب انتقال هوهمان من الأرض إلى المريخ.
- إيجاد v_∞ وC_3.
- إيجاد Δv لمغادرة المدار الأرضي المنخفض.
- حساب الأدوار الاقترانية وشرح نوافذ الإطلاق.

المفاهيم الأساسية

- بعيدًا عن الكواكب، تتبع المركبة قطعًا مخروطيًا حول الشمس مع $\mu_{Sun} = 1.327 \times 10^{20}$ m³/s². وانتقال هوهمان من الأرض إلى المريخ قطع ناقص من 1 AU إلى 1.524 AU.
- القطوع المخروطية الموصولة: قرب كل كوكب يُستخدم قطع زائد بالنسبة إلى الكوكب؛ وبعيدًا يُستخدم القطع الناقص حول الشمس؛ وتُطابق السرعات عند مجال التأثير.
- سرعة الفائض الزائدية عند المغادرة v_∞ هي السرعة المطلوبة حول الشمس ناقص السرعة المدارية للأرض. و$C_3 = v_\infty^2$ هي طاقة الإطلاق.
- من مدار انتظار دائري، احتراق المغادرة $\Delta v = \sqrt{(v_\infty^2 + 2\mu/r)} - \sqrt{(\mu/r)}$، مستفيدًا من أثر أوبرث للاحتراق في عمق بئر الجاذبية.
- تتكرر نوافذ الإطلاق كل دور اقتراني، $1/|1/T_1 - 1/T_2|$: نحو 2.1 سنة للمريخ. وتغيّر مساعدات الجاذبية سرعة المركبة حول الشمس مجانًا بالتحليق قرب كوكب.

المعادلات الأساسية

$$t = \pi\sqrt{\frac{a^3}{\mu_\odot}}$$

`t=π(a^3)/(μ_)`

زمن الانتقال

$$v_\infty = \sqrt{\mu_\odot\left(\frac{2}{r_1} - \frac{1}{a}\right)} - \sqrt{\frac{\mu_\odot}{r_1}}$$

`v_∞=μ_(2r_1-1a)-(μ_)/(r_1)`

سرعة الفائض عند المغادرة

$$\Delta v = \sqrt{v_\infty^2 + \frac{2\mu}{r}} - \sqrt{\frac{\mu}{r}}$$

Δ v=_∞^2+(2μ)/(r)-μ r

احتراق المغادرة

$$S = \frac{1}{1/T_1 - 1/T_2}$$

S=(1)/(1/T_1-1/T_2)

الدور الاقتراني

أمثلة محلولة خطوة بخطوة

مثال 9.1 أوجد زمن انتقال هوهمان من الأرض إلى المريخ.

1. a = (1 + 1.524)/2 AU = 1.888 × 10¹¹ m.
2. t = π√(a³/μ_Sun).

الإجابة: t = 259 يومًا.

مثال 9.2 أوجد v∞ وC₃ عند المغادرة.

1. سرعة الأرض √(μ_Sun/1 AU) = 29.78 km/s.
2. سرعة الحضيض الشمسي للانتقال من vis-viva.

الإجابة: v∞ = 2.95 km/s; C₃ = 8.68 km²/s².

مثال 9.3 أوجد احتراق المغادرة من مدار انتظار على ارتفاع 400 km.

1. Δv = √(2946² + 2μ/6.778 × 10⁶) − 7669.

الإجابة: Δv = 3.57 km/s.

تمارين

حلّ كلًّا منها على الورق أولًا، ثم تحقق.

1. أوجد الدور المداري للمريخ من قانون كبلر الثالث.

   1.88 = 1.524^1.5 سنة.

2. أوجد الدور الاقتراني بين الأرض والمريخ.

1/(1 − 1/1.881) = 2.13 سنة.

3. لماذا الاحتراق في عمق بئر الجاذبية؟

أثر أوبرث: طاقة حركية أكبر لكل Δv.

4. هل تغيّر مساعدة الجاذبية السرعة بالنسبة إلى الكوكب؟

لا، بالنسبة إلى الشمس فقط.

مفاهيم خاطئة شائعة

خرافة: يمكنك الإطلاق إلى المريخ بتكلفة منخفضة في أي وقت.
في الحقيقة: فقط في نوافذ كل 2.1 سنة.

خرافة: v∞ تساوي Δv الاحتراق.
في الحقيقة: الاحتراق من LEO أكبر.

خرافة: مساعدات الجاذبية تخرق حفظ الطاقة.
في الحقيقة: يفقد الكوكب مقدارًا ضئيلًا.

بطاقات تعليمية

حول الشمس

μ_Sun = 1.327 × 10²⁰.

القطوع المخروطية الموصولة

قطع زائد + قطع ناقص.

v∞

سرعة الفائض.

C_3

v_∞^2.

الدور الاقتراني

$1/(1/T_1 - 1/T_2)$.

مساعدة الجاذبية

Δv حول الشمس مجانًا.

اختبار ذاتي

1. يستغرق انتقال هوهمان من الأرض إلى المريخ نحو...

259 يومًا

30 يومًا

3 سنوات

1 يوم

259 يومًا. نصف دور القطع الناقص.

2. C_3 هي...

v_∞^2

∞v

Δv^2

μ/r

v_∞^2. طاقة الإطلاق.

3. تتكرر نوافذ المريخ كل...

2.1 سنة

سنة واحدة (1)

6 أشهر

10 سنوات

2.1 سنة. الدور الاقتراني.

4. تبدّل القطوع المخروطية الموصولة الإطار عند...

مجال التأثير

الأوج

القمر

عشوائيًا

مجال التأثير. التعريف.

أعد هذا الاختبار

كيف يساعد هذا في إنقاذ الكوكب

تصف NASA بعثة DART بأنها أول بعثة على الإطلاق مخصصة لإثبات حرف كويكب بتغيير حركته عبر الاصطدام الحركي. وقبل اللقاء، عرّفت NASA النجاح بأنه تغير في دور مدار Dimorphos بمقدار 73 ثانية أو أكثر؛ وقد تجاوز التغير المقيس البالغ 32 دقيقة ذلك بأكثر من 25 مرة.

تشير NASA إلى أن Dimorphos وDidymos لم يشكلا أي خطر على الأرض قبل الاختبار أو بعده. ويعتمد الدفاع الكوكبي تحديدًا على أدوات المسارات بين الكواكب في هذه الوحدة.

على Saving Planets: الفيزياء I · الحلول

المصادر: NASA: NASA Confirms DART Mission Impact Changed Asteroid's Motion in Space (Oct. 11, 2022) (https://www.nasa.gov/news-release/nasa-confirms-dart-mission-impact-changed-asteroids-motion-in-space/)

مصادر تعلّم مجانية

- NASA: Basics of Space Flight (https://science.nasa.gov/learn/basics-of-space-flight/): دليل مجاني من NASA عن المسارات بين الكواكب.
- NASA's Eyes on the Solar System (https://eyes.nasa.gov/apps/solar-system/): مسارات حقيقية بين الكواكب.
- MIT OpenCourseWare 16.346 Astrodynamics (Fall 2008) (https://ocw.mit.edu/courses/16-346-astrodynamics-fall-20/08/): ملاحظات MIT.
- PhET: My Solar System (https://phet.colorado.edu/en/simulations/my-solar-system): مدارات متعددة الأجسام.

أنهيت هذه الوحدة

استدامة الفضاء: الحطام والتخلص والدفاع الكوكبي

بيئة الحطام المداري، وسرعات التصادم وطاقاته، وتتالي كيسلر، والتخلص عند نهاية العمر وΔv الخروج من المدار، ومدارات المقبرة لـ GEO، وفحص الاقترانات وتجنب التصادم، والدفاع الكوكبي بالاصطدام الحركي.

أهداف التعلّم

في نهاية هذه الوحدة ستستطيع أن:

- حساب طاقة اصطدام الحطام.
- تحديد حجم احتراق الخروج من المدار.
- شرح تتالي كيسلر.
- تكميم نتيجة DART.

المفاهيم الأساسية

- يحوي المدار الأرضي المنخفض ملايين القطع من الحطام: أقمار ميتة وأجزاء صواريخ وشظايا ورقائق طلاء. وعند السرعات المدارية تحمل حتى القطع الصغيرة جدًا طاقة هائلة.
- الطاقة الحركية ½mv² تزداد مع مربع السرعة: شظية كتلتها 1 g بسرعة 10 km/s (سرعة نسبية نموذجية) تحمل 50 kJ.
- تُنتج التصادمات مزيدًا من الشظايا، فتسبب مزيدًا من التصادمات: تتالي كيسلر. والحد من الحطام الجديد أرخص بكثير من إزالته.
- التخلص: تخفض أقمار LEO حضيضها ليُسقطها السحب؛ وتُرفع أقمار GEO إلى مدار مقبرة أعلى ببضع مئات من الكيلومترات.
- يفحص المشغلون الاقترابات (الاقترانات) ويُجرون احتراقات تجنب صغيرة عندما يكون احتمال التصادم مرتفعًا جدًا.

المعادلات الأساسية

$$E_k = \tfrac{1}{2} m v^2$$

```
E_k=12mv^2
```

طاقة الاصطدام

$$\Delta v_{deorbit} = v_c - v_a$$

```
Δ v_deorbit=v_c-v_a
```

احتراق خفض الحضيض

$$\frac{\Delta T}{T}$$

التغير النسبي في الدور

$$v_a = \sqrt{\mu\left(\frac{2}{r} - \frac{1}{a}\right)}$$

v_a=μ(2r-1a)

vis-viva بعد الاحتراق

أمثلة محلولة خطوة بخطوة

مثال 10.1 حوّل سرعة الحطام التي تذكرها NASA وهي 18000 mph إلى km/s.

1. 18,000 × 0.44704 m/s.

الإجابة: 8.05 km/s.

مثال 10.2 أوجد الطاقة الحركية لشظية كتلتها 1 g بسرعة نسبية 10 km/s (قيمة نموذجية).

1. E = ½ × 0.001 × 10,000² .

الإجابة: E = 50 kJ من شظية بكتلة مشبك ورق.

مثال 10.3 قصّر DART مدار Dimorphos البالغ 11 h 55 min (715 min) بمقدار 32 دقيقة. أوجد التغير النسبي والهامش فوق عتبة النجاح لدى NASA البالغة 73 s.

1. 32/715.
2. 73 s/1920 s.

الإجابة: أقصر بنسبة 4.48%؛ 26.3 ضعف العتبة.

تمارين

حلّ كلًّا منها على الورق أولًا، ثم تحقق.

1. أوجد Δv الخروج من المدار من 700 km إلى حضيض 200 km.

   139 m/s (الوحدة 4).

2. خلال كم سنة يجب التخلص من أقمار LEO بموجب قاعدة FCC؟

   5 سنوات بعد انتهاء البعثة.

3. لماذا منع الحطام أرخص من إزالته؟

   الإزالة تتطلب مركبة مخصصة لكل جسم.

4. إلى أين تذهب أقمار GEO في نهاية عمرها؟

إلى مدار مقبرة فوق GEO.

مفاهيم خاطئة شائعة

خرافة: الفضاء أكبر من أن يمتلئ.
في الحقيقة: المدارات المفيدة محدودة ومزدحمة.

خرافة: الحطام الصغير غير ضار.
في الحقيقة: الطاقة تزداد مع v^2.

خرافة: الخروج من المدار يحتاج احتراقات ضخمة.
في الحقيقة: خفض الحضيض من 700 km يحتاج نحو 139 m/s.

بطاقات تعليمية

الحطام

ملايين القطع في LEO.

طاقة الاصطدام

$\frac{1}{2}mv^2$.

كيسلر

تتالي التصادمات.

الخروج من المدار

خفض الحضيض.

المقبرة

فوق GEO.

DART

تغير في الدور قدره 32 دقيقة.

اختبار ذاتي

1. تزداد طاقة الحطام مع...

v^2

v

v^3

$1/v$

$\frac{1}{2}mv^2$. v^2.

2. تتالي كيسلر هو...

تصادمات تُنتج مزيدًا من الحطام

إطلاق

انتقال

السحب

تصادمات تُنتج مزيدًا من الحطام. تفاعل متسلسل.

3. قاعدة FCC للتخلص في LEO...

5 سنوات

25 سنة

سنة واحدة (1)

لا شيء

5 سنوات. FCC-22-74.

4. غيّر DART الدور بمقدار...

32 min

73 s

12 h

0

32 min. نتيجة NASA.

أعد هذا الاختبار

كيف يساعد هذا في إنقاذ الكوكب

تذكر مكتبة مقر NASA أن هناك ملايين القطع من الخردة الفضائية في المدار الأرضي المنخفض، تتحرك بسرعة تصل إلى 18000 ميل في الساعة، أي أسرع من الرصاصة بنحو سبع مرات، مع ما يقارب 6000 طن من المواد في المدار المنخفض. وبدأ برنامج

NASA للحطام المداري عام 1979 في Johnson Space Center.

تُلزم قاعدة FCC لعام 2022 مشغلي المدار الأرضي المنخفض بالتخلص من الأقمار خلال 5 سنوات من انتهاء بعثاتها. وأصبح تخطيط احتراق التخلص منذ اليوم الأول جزءًا من التصميم المسؤول للبعثات.

على Saving Planets: الحلول · رصد الأرض

المصادر: NASA Headquarters Library: Space Debris (https://www.nasa.gov/headquarters/library/find/bibliographies/space-debris/) · FCC: FCC Adopts New ‘5-Year Rule’ for Deorbiting Satellites (Report and Order FCC-22-74) (https://www.fcc.gov/document/fcc-adopts-new-5-year-rule-deorbiting-satellites-0)

مصادر تعلّم مجانية

- NASA Orbital Debris Program Office (https://orbitaldebris.jsc.nasa.gov/): مكتب برنامج NASA للحطام المداري.
- NASA Headquarters Library: Space Debris (https://www.nasa.gov/headquarters/library/find/bibliographies/space-debris/): قائمة قراءات NASA عن الحطام.
- NASA: NASA Confirms DART Mission Impact Changed Asteroid’s Motion in Space (Oct. 11, 2022) (https://www.nasa.gov/news-release/nasa-confirms-dart-mission-impact-changed-asteroids-motion-in-space/): نتيجة DART لدى NASA.
- MIT OpenCourseWare 16.346 Astrodynamics (Fall 2008) https://ocw.mit.edu/courses/16-346-astrodynamics-fall-20(/08/): ملاحظات MIT.

أنهيت هذه الوحدة

مجموعات المسائل

هذه التمارين داخل كل وحدة. حلّها على الورق أولًا، ثم افتح الإجابة.

1. الجاذبية ومسألة الجسمين والمدارات الدائرية
   4 مسائل
2. القطوع المخروطية والطاقة والعناصر المدارية
   4 مسائل
3. معادلة كيلر وزمن الطيران
   4 مسائل
4. الانتقالات المدارية: هوهمان وما بعده
   4 مسائل
5. تغيير المستوى والمناورات المركبة
   4 مسائل
6. الصواريخ وميزانيات Δv والمراحل
   4 مسائل
7. الاضطرابات: انتفاخ الأرض والسحب والمدارات المتزامنة مع الشمس
   4 مسائل
8. المسارات الأرضية والتغطية والكوكبات
   4 مسائل
9. الانتقالات بين الكواكب والقطوع المخروطية الموصولة
   4 مسائل
10. استدامة الفضاء: الحطام والتخلص والدفاع الكوكبي

المختبر (Astrodynamics lab)

المختبر هو الجزء العملي من المقرر. وهو هنا مجاني وللتدريب فقط، دون ساعات معتمدة.

يُجرى كل مختبر في محاكاة مجانية أو جدول بيانات، فلا توجد مخاطر مادية. خذ فترات راحة من الشاشة، واجلس بوضعية سليمة، وأبعد الكابلات عن الممرات.

مرجع السلامة: OSHA: Walking-working surfaces (slip, trip and fall hazards) (https://www.osha.gov/walking-working-surfaces)

المختبر A: المدارات الدائرية في PhET

الأسبوع 1

الهدف: استكشف كيف تتغير سرعة المدار ودوره مع المسافة في PhET Gravity and Orbits، ثم احسب مدارات أرضية حقيقية.

$$v_c = \sqrt{\mu / r}, \;\; T = 2\pi\sqrt{r^3/\mu}$$

v_c=μ/r,\ \ T=2π^3/μ

المدارات الدائرية

الإجراء

1. افتح PhET Gravity and Orbits؛ وأطلق القمر الصناعي على مسافات وسرعات مختلفة.
2. أوجد السرعة التي تعطي دائرة عند كل مسافة.
3. احسب v وT لمدار على ارتفاع 400 km، ومدار Landsat على ارتفاع 705 km، وGEO.
4. قارن الاتجاه بالمحاكاة.

جدول البيانات

المدار	v (km/s)	T
400 km	7.67	92.6 min
705 km	7.50	98.9 min
GEO (35,786 km)	3.07	23.93 h

قيم محسوبة.

مثال حسابي

1. v(705 km) = √(3.986 × 10¹⁴/7.083 × 10⁶) = 7.50 km/s.
2. T(GEO) = 86,164 s = 23.93 h.

السلامة

- حاسوب فقط.

بديل منزلي أو افتراضي

- يصلح أي متصفح.

PhET: Gravity and Orbits (https://phet.colorado.edu/en/simulations/gravity-and-orbits)

الصلة بالكوكب: تذكر NOAA أن أقمار GOES تدور على ارتفاع 22236 ميلًا فوق خط الاستواء. NOAA NESDIS: GOES-R Series mission (https://www.goes-r.gov/mission/mission.html)

☐ **أكملت هذا المختبر (عمليًا أو افتراضيًا)**

المختبر B: قانون كبلر الثالث مع كواكب حقيقية

الأسبوع 3

الهدف: تحقق من $T^2 \propto a^3$ للكواكب واستكشف المدارات الإهليلجية في PhET Kepler’s Laws.

$$T_{yr} = a_{AU}^{3/2}$$

```
T_yr=a_AU^3/2
```

قانون كبلر الثالث (الشمس)

الإجراء

1. استكشف PhET Kepler’s Laws: غيّر الاختلاف المركزي وراقب المساحات المتساوية الممسوحة في أزمنة متساوية.
2. أدخل أنصاف المحاور الكبرى للكواكب بوحدة AU.
3. احسب T = a^1.5 بالسنوات.
4. ارسم log T مقابل log a وأوجد الميل.

جدول البيانات

الكوكب	a (AU)	T (سنوات)
الأرض	1.000	1.000
المريخ	1.524	1.881
المشتري	5.203	11.87

أنصاف المحاور الكبرى قيم مرجعية؛ وميل log T مقابل log a يساوي 1.5.

مثال حسابي

1. T(المريخ) = 1.524^1.5 = 1.881 سنة.
2. T(المشتري) = 5.203^1.5 = 11.87 سنة.

السلامة

- حاسوب فقط.

بديل منزلي أو افتراضي

- يصلح أي متصفح وجدول بيانات.

PhET: Kepler’s Laws (https://phet.colorado.edu/en/simulations/keplers-laws) · PhET: My Solar System (https://phet.colorado.edu/en/simulations/my-solar-system)

الصلة بالكوكب: وقّتت NASA مدار Dimorphos قبل DART وبعده لقياس تغير قدره 32 دقيقة. NASA: NASA Confirms DART Mission Impact Changed Asteroid’s Motion in Space (Oct. 11, 2022) (https://www.nasa.gov/news-release/nasa-confirms-dart-mission-impact-changed-asteroids-motion-in-space/)

- [ ] **أكملت هذا المختبر (عمليًا أو افتراضيًا)**

المختبر C: حاسبة انتقال هوهمان

الأسبوع 6

الهدف: أنشئ جدول بيانات يحسب الاحتراقين وΔv الكلي وزمن الانتقال لأي زوج من المدارات الدائرية.

$$a = \frac{r_1 + r_2}{2}, \;\; v^2 = \mu\left(\frac{2}{r} - \frac{1}{a}\right)$$

a=(r_1+r_2)/(2),\ \ v^2=μ(2r-1a)

مناورة هوهمان

الإجراء

1. أدخل μ ونصفي القطرين.
2. احسب السرعات الدائرية وسرعات مدار الانتقال والاحتراقين وزمن الانتقال.
3. نفّذ من LEO (400 km) إلى GEO ومن LEO إلى مدار متوسط على ارتفاع 20200 km.
4. أضف خيار تغيير المستوى للاحتراق الثاني.

جدول البيانات

الانتقال	Δv_1 (km/s)	Δv_2 (km/s)	المجموع	الزمن (h)
400 km → GEO	2.398	1.456	3.854	5.29
400 km → 20,200 km	2.012	1.404	3.416	2.98

قيم محسوبة، في مستوى واحد.

مثال حسابي

1. $\Delta v_1(\text{GEO}) = 10.066 - 7.669 = 2.398$ km/s.
2. الزمن $= \pi\sqrt{(a^3/\mu)} = 2.98$ h (20200 km).

السلامة

- حاسوب فقط.

بديل منزلي أو افتراضي

- أي برنامج جداول بيانات يفي بالغرض.

NASA’s Eyes on the Solar System (https://eyes.nasa.gov/apps/solar-system/)

الصلة بالكوكب: تشترط FCC التخلص من أقمار LEO خلال 5 سنوات من انتهاء البعثة. FCC: FCC Adopts New ‘5-Year Rule’ for Deorbiting Satellites (Report and Order FCC-22-74) (https://www.fcc.gov/document/fcc-adopts-new-5-year-rule-deorbiting-satellites-0)

- [ ] أكملت هذا المختبر (عمليًا أو افتراضيًا)

المختبر D: معادلة الصاروخ والمراحل

الأسبوع 8

الهدف: شاهد كيف يزداد Δv مع نسبة الكتلة وكيف تتفوق المراحل على المرحلة الواحدة.

$$\Delta v = I_{sp} g_0 \ln \frac{m_0}{m_f}$$

```
Δ v=I_spg_0(m_0)/(m_f)
```

معادلة الصاروخ

الإجراء

1. اضبط I_sp = 300 s.
2. احسب Δv لنسب كتلة 2 و4 و8.
3. قارن مرحلة واحدة بنسبة 9 بمرحلتين بنسبة 3.
4. أوجد نسبة الكتلة اللازمة لـ 9.4 km/s عند I_sp = 350 s.

جدول البيانات

نسبة الكتلة	Δv (km/s)
2	2.04
4	4.08
8	6.12

قيم محسوبة؛ مرحلة واحدة بنسبة 9 ومرحلتان بنسبة 3 تعطيان Δv المثالي نفسه (6.46 km/s)، لكن الصاروخ متعدد المراحل يحتاج هيكلًا أقل بكثير لكل مرحلة.

مثال حسابي

1. Δv(8) = 300 × 9.80665 × ln 8 = 6.12 km/s.
2. مرحلتان بنسبة 3: 2 × 300 × 9.80665 × ln 3 = 6.46 km/s.

السلامة

- على الحاسوب فقط. لا تبنِ صواريخ بالوقود الدافع ولا تطلقها في هذا المختبر.

بديل منزلي أو افتراضي

- أي برنامج جداول بيانات يفي بالغرض.

NASA Glenn: Rocket thrust (https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/rocket/rktpow.html)

الصلة بالكوكب: أُطلقت بعثة DART التابعة لـ NASA على Falcon 9 من Vandenberg في نوفمبر 2021. NASA Science: Double Asteroid Redirection Test (DART) (https://science.nasa.gov/mission/dart/)

☐ **أكملت هذا المختبر (عمليًا أو افتراضيًا)**

المختبر E: تصميم مدار متزامن مع الشمس

الأسبوع 10

الهدف: احسب الميل المتزامن مع الشمس لعدة ارتفاعات وقارنه بـ Landsat 9.

$$\cos i = -\frac{\dot{\Omega}_{SS}}{1.5 n J_2 (R/r)^2}$$

```
i=-_SS1.5nJ_2(R/r)^2
```

شرط التزامن مع الشمس

الإجراء

1. أدخل μ وR وJ₂ والقيمة المطلوبة 0.9856°/يوم.
2. احسب i لمدارات دائرية على ارتفاعات 500 و705 و800 km.
3. قارن 705 km بقيمة Landsat 9 المنشورة 98.2°.
4. ارسم i مقابل الارتفاع.

جدول البيانات

الارتفاع (km)	i (درجة)
500	97.40
705	98.21
800	98.60

قيم محسوبة؛ الميل المنشور لـ Landsat 9 هو 98.2°.

مثال حسابي

1. n(705 km) = √(μ/7.083³ × 10¹⁸) = 1.059 × 10⁻³ rad/s.
2. i(705) = 98.21°.

السلامة

- حاسوب فقط.

بديل منزلي أو افتراضي

- أي برنامج جداول بيانات يفي بالغرض.

NASA Science: Landsat 9 (https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-9/landsat-9-overview/)

الصلة بالكوكب: تذكر NASA أن Landsat 9 يعبر خط الاستواء نحو الساعة 10:12 صباحًا بالتوقيت المحلي. NASA Science: Landsat 9 (https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-9/landsat-9-overview/)

☐ **أكملت هذا المختبر (عمليًا أو افتراضيًا)**

المختبر F: المسارات الأرضية في NASA’s Eyes

الأسبوع 11

الهدف: راقب أقمارًا حقيقية لرصد الأرض في NASA’s Eyes واحسب إزاحة مسارها الأرضي ودورة تكراره.

$$\Delta\lambda = 360^\circ \frac{T}{T_{sid}}$$

```
Δ=360°_sid
```

انزياح المسار الأرضي

الإجراء

1. افتح NASA’s Eyes وتابع قمرًا لرصد الأرض لبضعة مدارات.
2. لاحظ كيف يقع كل مسار غرب سابقه.
3. احسب الإزاحة لمدار مدته 98.87 min.
4. أوجد عدد المدارات في 16 يومًا.

جدول البيانات

الكمية	القيمة
الدورة	98.87 min
الإزاحة لكل مدار	24.8°
الإزاحة عند خط الاستواء	2760 km
المدارات في 16 يومًا	233

محسوب لمدار دائري على ارتفاع 705 km.

مثال حسابي

1. Δλ = 360 × 5932/86,164 = 24.8°.
2. 16 × 14.564 = 233 مدارًا.

السلامة

- حاسوب فقط.

بديل منزلي أو افتراضي

- يصلح أي متصفح.

NASA’s Eyes on the Solar System (https://eyes.nasa.gov/apps/solar-system/)

الصلة بالكوكب: تذكر NASA أن Landsat 8 و9 معًا يعيدان زيارة كل مكان كل 8 أيام. NASA Science: Landsat 9 (https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-9/landsat-9-overview/)

☐ **أكملت هذا المختبر (عمليًا أو افتراضيًا)**

مجموعات تدريب للامتحان

وقّت نفسك: نحو 10 دقائق لكل مسألة. ثم قارن بالحلول الكاملة.

مجموعة تمارين منتصف الفصل (الوحدات 5–1)

1. أوجد السرعة الدائرية على ارتفاع 1000 km فوق الأرض.

   .1 $\sqrt{(3.986 \times 10^{14} / 7.378 \times 10^{6})}$.

   الإجابة: 7.35 km/s.

2. أوجد دور ذلك المدار.

   .1 $2\pi\sqrt{(r^3/\mu)}$.

   الإجابة: 105.1 min.

3. مدار فيه $r_p = 7000$ km و$r_a = 14000$ km. أوجد e.

   .1 7000/21,000.

   الإجابة: 0.333.

4. أوجد السرعة عند الحضيض لذلك المدار.

   .1 $\sqrt{(\mu(2/7 \times 10^{6} - 1/1.05 \times 10^{7}))}$.

   الإجابة: 8.71 km/s.

5. أوجد Δv اللازم لتغيير الميل بمقدار 5° عند 7.5 km/s.

   .1 $2 \times 7.5 \times \sin 2.5°$.

   الإجابة: 0.654 km/s.

مجموعة التدريب النهائية (كل الوحدات)

1. أوجد Δv عند $I_{sp} = 320$ s ونسبة كتلة 5.

   .1 $320 \times 9.80665 \times \ln 5$.

   الإجابة: 5.05 km/s.

2. أوجد معدل العقدة عند 600 km، i = 97.8°.

.−1.5nJ₂(R/r)² cos i .1

الإجابة: /°0.987+يوم.

3. أوجد إزاحة المسار الأرضي لكل مدار لمدار مدته 100 min.

.360 × 6000/86,164.1 .1

الإجابة: 25.1°.

4. أوجد زمن انتقال هوهمان بين الأرض والزهرة (الزهرة عند 0.723 AU).

.a = 0.8615 AU مع π√(a³/μ_Sun) .1

الإجابة: 146 يومًا.

5. أوجد طاقة شظية كتلتها 10 g بسرعة 8 km/s.

.½ × 0.01 × 8000² .1

الإجابة: 320 kJ.

6. أوجد الدور الاقتراني للأرض والمشتري (11.87 سنة).

.1/(1 − 1/11.87) .1

الإجابة: 1.092 سنة.

ورقة الصيغ

$$v_c = \sqrt{\mu/r},\ T = 2\pi\sqrt{a^3/\mu},\ v_{esc} = \sqrt{2\mu/r}$$

$$\varepsilon = -\mu/(2a),\ v^2 = \mu(2/r - 1/a)$$

$$r = (h^2/\mu)/(1 + e\cos\nu),\ e = (r_a - r_p)/(r_a + r_p)$$

$$M = E - e\sin E,\ n = \sqrt{\mu/a^3}$$

$$\Delta v_{Hohmann} = (v_p - v_{c1}) + (v_{c2} - v_a)$$

$$\Delta v = 2v\sin(\Delta i/2),\ \Delta v^2 = v_1^2 + v_2^2 - 2v_1 v_2\cos\Delta i$$

$$\Delta v = I_{sp} g_0 \ln(m_0/m_f)$$

$$\dot{\Omega} = -\tfrac{3}{2} n J_2 (R/p)^2 \cos i$$

$$\Delta\lambda = 360^\circ T/T_{sid}$$

$$v_\infty = v_{transfer} - v_{planet},\ C_3 = v_\infty^2,\ S = 1/(1/T_1 - 1$$

$$E_k = \tfrac{1}{2}mv^2$$

الثوابت

الثابت	القيمة
الأرض (قيم مرجعية)	$\mu = 3.986 \times 10^{14}\ m^3/s^2$, $R = 6378\ km$, $J_2 = 1.0826 \times 10^{-3}$، اليوم النجمي $86164.1\ s$
الشمس (قيمة مرجعية)	$\mu = 1.327 \times 10^{20}\ m^3/s^2$, $1\ AU = 1.496 \times 10^{11}\ m$
مدار المريخ (قيمة مرجعية)	$a = 1.524\ AU$
الجاذبية المعيارية	$g_0 = 9.80665\ m/s^2$
1 ميل	1.609344 km
1 mph	0.44704 m/s

المصدر: NIST Guide to the SI, Appendix B.9: conversion factors (https://www.nist.gov/pml/special-publication-811/nist-guide-si-appendix-b-conversion-factors/nist-guide-si-appendix-b9)

نصوص ومحاكاة مجانية

استخدم هذه المحاضرات المجانية وأدلة NASA والمحاكاة إلى جانب المقرر.

- MIT OpenCourseWare 16.346 Astrodynamics (Fall 2008) (https://ocw.mit.edu/courses/16-346-astrodynamics-fall-2008/): محاضرات MIT ومسائل مجانية في الديناميكا الفلكية.
- MIT OpenCourseWare 16.07 Dynamics (Fall 2009) (https://ocw.mit.edu/courses/16-07-dynamics-fall-2009/): ملاحظات MIT مجانية في الديناميكا عن المدارات.
- NASA: Basics of Space Flight (https://science.nasa.gov/learn/basics-of-space-flight/): دليل NASA مجاني عن المدارات والبعثات.
- OpenStax University Physics Volume 1, 13.5 Kepler’s laws (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/13-5-keplers-laws-of-planetary-motion): قسم من كتاب مدرسي مجاني.
- PhET: Gravity and Orbits (https://phet.colorado.edu/en/simulations/gravity-and-orbits): المدارات بشكل تفاعلي.
- NASA’s Eyes on the Solar System (https://eyes.nasa.gov/apps/solar-system/): مسارات حقيقية لمركبات فضائية بتقنية 3D.

مسرد المصطلحات

الأوج
أبعد نقطة في المدار.

الاقتران
اقتراب بين جسمين فضائيين.

C_3
طاقة الإطلاق، مربع v_∞.

الاختلاف المركزي
مدى استطالة المدار.

المدار الثابت بالنسبة للأرض

مدار استوائي دورته يوم نجمي واحد.

المسار الأرضي
مسار النقطة الواقعة مباشرة أسفل القمر الصناعي.

مناورة هوهمان
انتقال باحتراقين على قطع ناقص مماس.

الميل
ميل مستوى المدار عن خط الاستواء.

J_2
حد تفلطح الأرض.

معادلة كبلر
$M = E - e \sin E$.

تتالي كيسلر
تفاعل متسلسل من تصادمات الحطام.

الشذوذ المتوسط
زاوية تزداد بانتظام مع الزمن.

القطوع المخروطية الموصولة
وصل القطوع المخروطية المتمركزة حول الكوكب وحول الشمس.

الحضيض
أقرب نقطة في المدار.

الدفع النوعي
الدفع لكل معدل تدفق وزن الوقود الدافع، بالثواني.

مدار متزامن مع الشمس
مدار يحافظ مستواه على زاوية ثابتة مع الشمس.

الدور الاقتراني
الزمن بين اصطفافين متكررين لجسمين يدوران.

الشذوذ الحقيقي
الزاوية من الحضيض إلى المركبة.

معادلة vis-viva
$v^2 = \mu(2/r - 1/a)$.

Δv
تغير السرعة الذي تتطلبه المناورة.

معايير التقييم الذاتي

لا تُمنح درجة ولا ساعات معتمدة. استخدم هذا لتقيّم بصدق أين أنت في كل وحدة.

المستوى	كيف يبدو
4 · إتقان	يرسم المدار والمناورات، ويختار معادلة vis-viva أو كبلر أو معادلة الصاروخ بشكل صحيح، ويحافظ على الوحدات بنظام SI، ويتحقق من الإجابات بالحالات الحدية.
3 · متمكن	يحل التمارين مع أخطاء عرضية في الوحدات.
2 · قيد التطور	يتبع الأمثلة المحلولة لكنه يخلط بين السرعات الدائرية وسرعات الانتقال.
1 · مبتدئ	يعوّض الأرقام في الصيغ دون رسم تخطيطي؛ يحتاج إلى مراجعة الوحدة.

الأوزان المقترحة إذا أردت درجة

الجزء	الوزن
تمارين	20%
المختبرات	25%
مجموعة تدريب منتصف الفصل	25%
مجموعة التدريب النهائية	30%

استهدف المستوى 3 أو أعلى في كل وحدة قبل الانتقال إلى الدورة التالية.

دورات ذات صلة

- هياكل الطيران والفضاء AERO 330
- الطرق العددية MATH 340
- الديناميكا الهوائية 1 AERO 310
- كل الدورات